第 38 卷第 2 期 生 态 学 报 Vol.38,No.2
2018 年 1 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Jan.,2018

DOI: 10.5846/stxb201701100079
曹永强,朱明明,李维佳.河北省典型区主要作物有效降雨量和需水量特征.生态学报,2018,38(2):560-570.
Cao Y Q,Zhu M M, Li W J.Effective precipitation and water requirements of crops in Hebei Province over 60 years.Acta Ecologica Sinica,2018,38(2):560-570.

河北省典型区主要作物有效降雨量和需水量特征

曹永强*,朱明明,李维佳
辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 116029

摘要:对作物全生育期内有效降雨量及需水规律的研究是进行合理灌溉及水资源优化配置的重要依据。以河北省鸡泽县为典型区域,利用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式和分段单值平均作物系数法对冬小麦、夏玉米和棉花的有效降雨量及需水规律进行计算,并通过 M-K 检验法分析近 60 a 来鸡泽县有效降雨量及作物需水量序列的趋势变化及突变现象。结果表明:近 60 a 鸡泽县冬小麦在生育中期需水量最大,为 210.2 mm,有效降雨量均集中在生育中期,缺水量以 13.2 mm/10 a 的速率呈显著性减少趋势;夏玉米在初始生长期需水量最大,为 157.7 mm,有效降雨量集中在生育中期,缺水量以 7.0 mm/10 a 的速率呈不显著减少趋势;棉花在快速发育期需水量最大,为 227.9 mm,有效降雨量集中在生育中期,缺水量以 22.3 mm/10 a 的速率呈显著性减少趋势。在一定程度上对河北省对农田灌溉用水效率和效益以及保障农作物科学高效生产具有重要的指导意义。

关键词:有效降雨量;需水量;缺水量;水分盈亏指数;鸡泽县

Effective precipitation and water requirements of crops in Hebei Province over 60 years

CAO Yongqiang*,ZHU Mingming,LI Weijia
Liaoning Normal University,School of urban and environmental science,Dalian 116029,*China*

Abstract: Effective precipitation and water requirements throughout a growing period are important for planning irrigation and optimal water resource allocation. In this study, Jize County of Hebei Province was selected as a typical region to calculate the winter wheat, summer maize, and cotton effective precipitation and water requirements, using the Penman-Monteith equation recommended by FAO and the piecewise single value average crop coefficient method. Using the Mann-Kendall test method, we analyzed the trends of changes in effective precipitation and crop water requirements over the 1955—2015 in Jize County. The water requirement of the main crops showed a significant decreasing trend, and the average water requirement of the crops in was in the order of cotton, winter wheat, and summer maize. The maximum water requirement of winter wheat was 593.2 mm in 1968, the maximum water requirement of summer maize was 581.6 mm in 1968, and the maximum water requirement of cotton was 710.4 mm in 1972. An obvious change in water requirements, which was directly related to the improvement of crop varieties, appeared in the 1980s. The different water requirements of crops are related to the physiological characteristics of the crops. The maximum water requirements of winter wheat, summer corn, and cotton were during different growth stages; these were the middle growth stage, initial growth stage, and rapid development stage, respectively. Effective precipitation showed no significant decreasing trend in any of the three crops. The daily precipitation required for crop growth gradually declined over time, and the average effective precipitation of the crops in was in the ascending order of cotton, summer maize, and winter wheat. The maximum effective precipitation of winter

基金项目:国家自然科学基金项目(51579126,51779114);中国气象局干旱气候变化与减灾重点实验室开放基金项目(IAM201511);中国科学院农业水资源重点实验室 2016 年对外开放基金项目(KFKT201602)

收稿日期:2017-01-10; **网络出版日期**:2017-09-14

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: caoyongqiang@lnnu.edu.cn

wheat was 170.4 mm in 1963, the maximum effective precipitation of summer maize was 320.5 mm in 1961, and the maximum effective precipitation of cotton was 422.7 mm in 1973. Because the winter wheat growth period is concentrated in the winter and precipitation is low in this season, the effective rainfall is far lower than that for the summer maize and cotton. All three crops experienced their maximum effective rainfall mid-season. Water deficits showed a decreasing trend for all three crops, and the average effective precipitation of the crops in was in the order of winter wheat, summer maize, and cotton. There was a change in water deficits over the 60-year period included in this study The moisture loss index of winter wheat fluctuated in the range of −100 to −60 and the moisture loss index of summer maize and cotton fluctuated in the range of −80 to −20. Although the maximum water requirement and effective rainfall appeared at the same growth stage in winter wheat, the moisture loss index is relatively low during that stage, leading to a higher level of drought, so the winter wheat water shortage situation is more serious. It should be noted that the water requirement of the three crops is similar to that of water demand.

Key Words: effective precipitation; water requirement; water deficit; moisture loss index; Jize County

全球气候变化不仅影响大气降水的时空变化特征,而且对作物需水量及作物生长都将产生巨大的影响[1]。作物需水量是指作物生长期间在适宜的土壤水分条件下的棵间蒸发量与叶面蒸腾量的总和,是作物本身生物学特性与环境条件综合作用的结果。它既是作物栽培管理与灌溉制度的依据,也是农田水利工程设计的基本参数。明确作物有效降雨量和需水量等水资源指标的变化特征,对合理利用降水资源、提高农业水资源利用率等都具有现实意义。河北省是农业大省,也是我国农业取用水量较大的地区之一,在水资源相对短缺的形势下,节水问题受到高度重视[2]。当前,河北省降水分布不均,农业灌溉用水量远高于其他行业用水。全年供水总量为用水总量的 77.27%,农业用水占总用水量的 72.4%。此外,由于供水量不能满足农业用水总量的需求,因此河北省农业灌溉取水源多来自地下水,据统计,河北省地下水年超采量高达 50 亿 m^3,超采率高达 23%[3]。长期超采地下水进行农业灌溉,不仅对区域内水资源及水环境的安全造成了严重的破坏[4-6],也造成了地面下沉、裂缝和坍塌的危险,对人类生命安全造成极大地威胁。在水资源有限的形势下,合理分配和利用农业灌溉水量十分必要。

近年来,关于有效降雨量与作物生长需水量受到广泛关注。邵东国等[7]运用时间序列法建立区域作物需水量长期预报模型,并应用此模型对南水北调中线工程进行了很好的预测;李勇等[8]利用联合国粮食与农业组织(FAO)推荐的方法对 1961—2007 年长江中下游地区需水量及有效降雨量进行计算,分别对不同地区单季稻和双季稻的灌溉需水量及其水分利用效率进行了分析,该方法同时也在宁夏、津京冀、四川等地灌区得到了广泛应用[9-11];从振涛等[12]利用 SRA1B 情景对我国 3 种主要作物需水量进行预测,结果较为准确并得到广泛认可。李春强等[13]利用 FAO 推荐的作物需水量计算方法对 1965—1999 年河北省冬小麦、夏玉米以及春玉米的作物需水量和缺水量变化趋势进行分析,但研究的时间序列较短且缺少对近 15 年的研究分析。本文选取河北省鸡泽县作为典型区域,选取区域内种植面积较大且种植结构较为稳定的冬小麦、夏玉米、棉花为 3 种主要作物类型,采用联合国粮食与农业组织(FAO)推荐的彭曼公式和作物系数法对有效降雨量及需水量等进行计算分析,最后通过 M-K 法,对 1956—2015 年鸡泽县主要灌区的 3 种主要作物的有效降雨量及作物需水量在不同水文年份的变化趋势进行分析,以期为河北省其他各市、县作物合理灌溉提供参考,从而实现水资源优化配置及高效利用。

1 研究区概况、研究方法及数据来源

1.1 研究区概况

本文以河北省邯郸市鸡泽县为典型区域。鸡泽县位于河北省南端,邯郸城区东北部。地理坐标介于 36°45′—36°58′N,114°43′—114°58′E 之间。县境南北最长 24.00 km,东西最宽 20.40 km,国土总面积

337.00 km^2。全县多年平均蒸发量为 1088.00 mm,年内 7—8 月为湿润期,9 月至次年 6 月为干旱期[14]。多年平均降水量为 497.90 mm,降水量 70%—80%集中在汛期的 6—9 月份,降水量时空分布不均,年际变化悬殊是其主要特征。鸡泽县是典型的平原农业县,全县的耕地面积为 2.62 万 hm^2,主要作物类型包括小麦、玉米、棉花、蔬菜等[15]。

1.2 研究方法

1.2.1 计算方法

(1)作物需水量计算

经国内外大量分析研究表明,在近 20 多种参考蒸散量计算作物需水量的多种计算方法中,彭曼-蒙蒂斯(Penman-Monteith)公式的计算结果在不同条件下都与实测值非常接近,精度较高[16]。因此,本文采用 Penman-Monteith 公式进行计算。该方法计算简单,并广泛应用于实际作物需水量的计算与预报[15]。经过多年改进,FAO-56 推荐使用的公式为:

$$ET_0=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)} \tag{1}$$

式中:ET_0 为逐日作物蒸散量(mm);Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率值(Kpa/℃);R_n 为作物表面的净辐射量(MJ/m^2);γ 是湿度计常数(kPa/℃);T 为日平均气温(℃);u_2 为 2 m 高处风速(m/s);G 为土壤热通量($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$);e_s 为空气饱和水汽压(kPa);e_a 为实际水汽压(kPa/℃)。

联合国粮食与农业组织(FAO)作物需水量专家咨询组认为,在充分供水条件下,通常把某一时段作物蒸散量和作物系数的乘积作为该作物某一时段作物需水量[17]。公式如下:

$$ET_C=K_C\times ET_0 \tag{2}$$

式中,ET_0 为逐日作物蒸散量(mm);K_C 为作物系数;ET_C 为逐日作物需水量(mm)。

(2)有效降雨量计算

有效降雨量特指旱作种植条件下,用于满足作物蒸散需要的那部分降雨量,它不包括地表径流和渗漏至作物根区以下的部分,同时也不包括淋洗盐分所需要的降水深层渗漏部分[3]。本文选取 FAO 推荐的降水量与需水量值的大小比较来确定有效降雨量,公式如下:

$$P_{ei}=\begin{cases}P & P\leqslant ET_C\\ ET_C & P\geqslant ET_C\end{cases} \tag{3}$$

$$P_e=\sum_{i=1}^{n}P_{ei} \tag{4}$$

其中,P_{ei} 为日有效降雨量(mm);P 为日降雨量(mm);P_e 作物生育期内的有效降雨量(mm);n 为生育期按旬分组的数量。

(3)缺水量计算

作物缺水量又叫灌溉需水量,是指在全生育期内各个生育阶段同期需水量和有效降雨量的差值,公式为:

$$W=ET_C-P_e \tag{5}$$

若 $W>0$,表示作物缺水,需补充灌溉;若 $W=0$,表示水分供需平衡;若 $W<0$,表示作物不缺水。

(4)水分盈亏指数计算

作物水分盈亏指数是农业生产监测的一项重要指标。通过计算可得作物水分供需关系,同时可以反映作物生长对水分的需求状况。

$$I=\frac{P_e-ET_C}{ET_C} \tag{6}$$

式中,I 为水分盈亏指数。当 $I>0$ 时,作物供水量>需水量;当 $I=0$ 时,供水量=需水量;当 $I<0$ 时,作物供水量<需水量。

1.2.2 研究方法

(1)曼-肯德尔(M-K)法

曼-肯德尔法是一种非参数统计检验方法。该方法借助 Matlab 软件的程序编写对序列数据进行计算,得到 UF 与 UK 两条曲线,并用于检验序列的变化趋势。若 UF 或 UK 的值大于 0,则表示序列呈上升趋势,小于 0 则表示序列呈下降趋势。当 UF 与 UK 两条曲线出现交点时,且交点在临界值之间则表示该时刻为突变开始时刻[18]。本文选定显著水平为 $\alpha=0.05$,则对应的临界值为±1.96。

(2)分段单值平均系数法

分段单值平均作物系数法是一种无需大量数据下的一种较为简单的计算作物系数的方法,可广泛应用于作物生育期需水量的计算、灌溉系统规划设计以及灌溉管理等方面。该方法是根据各阶段叶面蒸腾和土面蒸发的变化规律,用一个时段平均值表示该阶段的作物系数[19]。但该方法要求时段大,且未充分考虑土壤的影响。具体计算公式此处不再赘述,详见参考文献[19]。

1.3 数据来源

本文选取时间序列较长、结果较为准确的鸡泽县雨量站 1956—2015 年逐日降雨量的观测数据,所用气象资料均由中国气象科学数据共享服务网(http://cdc.cma.gov.cn/)提供,包括日最高气温、日最低气温、平均温度、平均风速、日照时数、平均相对湿度和平均气压等。气象数据在发布前已经过时间一致性和极值检验,质量可靠。

作物生育期数据来源于当地农业气象试验站,对 3 种主要作物(冬小麦、夏玉米、棉花)发育期数据进行统计后取多年平均值,结果如表 1 所示。其中,夏玉米和棉花的作物系数变化主要分为初始生长期(S_1)、快速发育期(S_4)、生育中期(S_5)和成熟期(S_6)四个阶段,由于冬小麦具越冬特性,因此还有冻融期(S_2)及越冬期(S_3)共 6 个阶段。

表 1　三种主要作物生育日期表

Table 1　Table of three main crop development date

作物 Crop	初始生长期 Initial growth stage	冻融期 Freezing and thawing stage	越冬期 Wintering stage	快速发育期 Fast development stage	生育中期 Middle growth stage	成熟期 Maturation stage
冬小麦 Winter wheat	10 月 8 日—11 月 28 日	11 月 29 日—12 月 5 日	12 月 6 日—3 月 19 日	3 月 20 日—4 月 28 日	4 月 29 日—5 月 31 日	6 月 1 日—6 月 8 日
夏玉米 Summer maize	6 月 9 日—7 月 4 日	/*	/	7 月 5 日—8 月 2 日	8 月 3 日—9 月 6 日	9 月 7 日—10 月 12 日
棉花 Cotton	4 月 23 日—5 月 18 日	/	/	5 月 19 日—6 月 29 日	6 月 30 日—8 月 14 日	8 月 15 日—10 月 20 日

* 符号"/"表示该作物不具有此生育期,因此无数据

2 结果分析

2.1 作物需水量分析

根据鸡泽县气象站近 60 a 逐日气象数据,结合公式(1)得到 1956—2015 年鸡泽县蒸散量,具体变化情况如图 1 所示。

如图 1,近 60 a 鸡泽县年蒸散量整体呈显著下降趋势,蒸散量的倾向率为-32.6 mm/10 a,年际间平均蒸散量为 1166.9 mm。1964 年鸡泽县年蒸散量最低,年蒸散量仅为 1031.6 mm,低于年际平均值的 11.6%。峰值出现在 1968 年,年蒸散量为 1447.0 mm,与年际平均蒸散量相比高出 280.2 mm。1965 年以后年际之间变化波动不一,整体上呈现增减交替出现,但总体呈下降趋势并通过了 $P<0.001$ 的显著性检验。

作物系数受作物种类、生育期、叶面积指数、地域等因素影响,不同环境下作物系数有所差别。作物系数反映的是作物本身的生物学特性对作物需水量的影响[20-21]。本文根据分段单值平均作物系数法,结合表 1

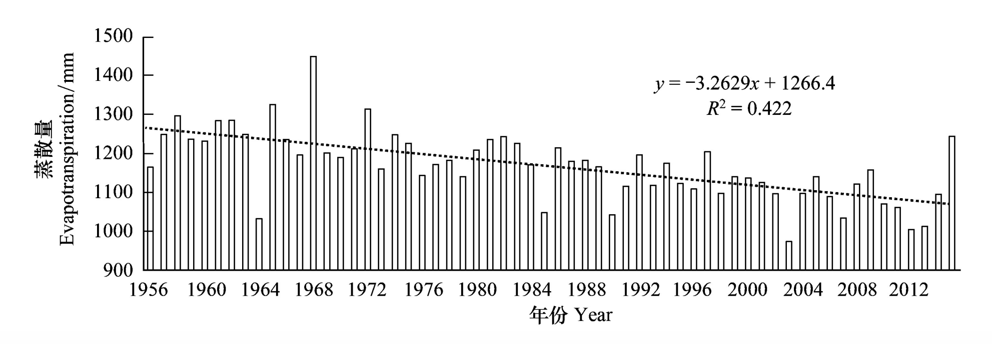


图 1　1956—2015 年鸡泽县蒸散发量变化趋势图

Fig.1　Change trend of evaporation in Jize county during 1956—2015

中作物发育期情况,得到 3 种主要作物在不同生育期的作物系数。3 种主要作物不同生育期作物系数的计算结果如图 2 所示。

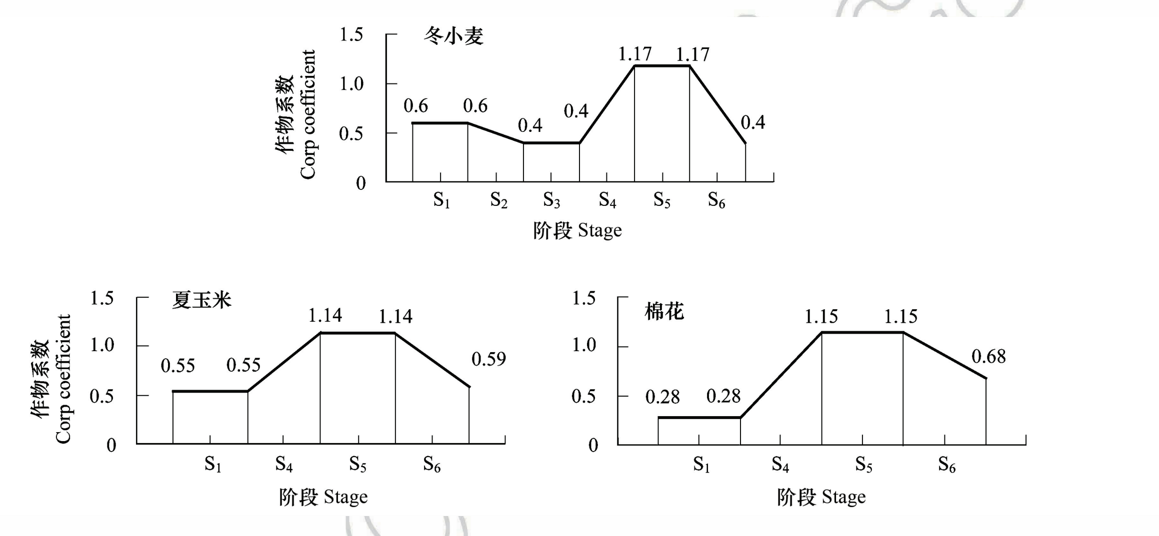


图 2　不同生育期作物系数变化趋势图

Fig.2　Variation trend of crop coefficient at different growth stages

初始生长期(S1)、冻融期(S2)及越冬期(S3)快速发育期(S4)、生育中期(S5)和成熟期(S6)

如图 2 不同生育期,冬小麦值 K_C在[0.4,1.17]区间内变化,夏玉米 K_C在[0.55,1.14]区间内变化,4 个时期内棉花 K_C在[0.28,1.15]区间内变化。根据作物需水量的计算公式(2),得到近 60 a 鸡泽县不同作物在不同时期的作物需水量,如图 3 所示。

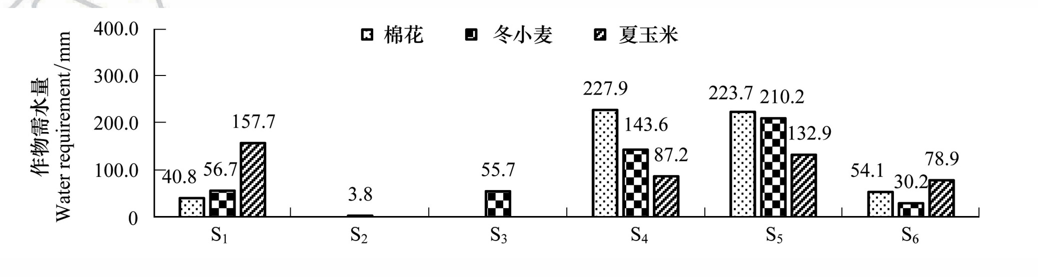


图 3　近 60 a 不同生育期作物需水量变化情况

Fig.3　Changes of crop water requirement at different growth stages in recent 60 years

整体来看,近 60 a 不同生育期的冬小麦、夏玉米及棉花平均作物需水量分别为 83.4、114.2、136.6 mm,且各生育期之间需水量不同,棉花需水量差异最大。初始生长期,各作物间作物需水量有所差异,夏玉米的需水量最大。仅冬小麦存在冻融期及越冬期,且作物需水量较小。快速发育期棉花需水量达到最大值,是平均需

水量的 166.8%,冬小麦需水量是上一时期的 257.8%,夏玉米的需水量相较于初始生长期需水量减少 44.7%。在生育中期,冬小麦的需水量达到最大值。成熟期 3 种作物需水量波动最大,需水量迅速减少。

结合公式(1)和(2)对 3 种主要作物在近 60 a 作物需水量进行计算。具体变化情况如图 4 所示。

近 60 a 来,鸡泽县 3 种作物需水量年际变化如图 4 所示。整体来看,3 种作物需水量均呈显著性减少的趋势变化。冬小麦需水量整体呈显著性减少趋势变化,变化倾向率为−16.4 mm/10 a,多年平均需水量为 500.5 mm;1956—1976 年呈不显著增加趋势;1977—1987 年呈不显著减少趋势,且 1985 年出现 1 个突变点;1988 年以后冬小麦需水量呈显著性减少趋势变化。夏玉米需水量整体呈显著性减少趋势变化,变化倾向率为−13.3 mm/10 a,多年平均需水量为 456.8 mm;1956—1958 年呈不显著增加趋势;1959—1986 年呈不显著减少趋势;至 1988 年出现 1 个突变点,1989 年以后均呈显著性减少趋势。棉花需水量整体呈显著减少趋势变化,变化倾向率为−28.7 mm/10 a,多年平均需水量为 575.7 mm;1956—1977 年呈不显著减少趋势,且年际间变化幅度较小;1978—2015 年呈显著性减少的趋势变化。

将本文计算结果与文献[11]李春强等对河北省近 35 年同一作物需水量变化趋势分析的计算结果进行对比,本文计算结果略大,这是因为本文数据来源及数据筛检较为严苛,且典型区域的选择不同,加上本文研究时间序列更为完整,因此准确度更高,计算结果有所差异,但作物需水量的变化趋势基本一致。

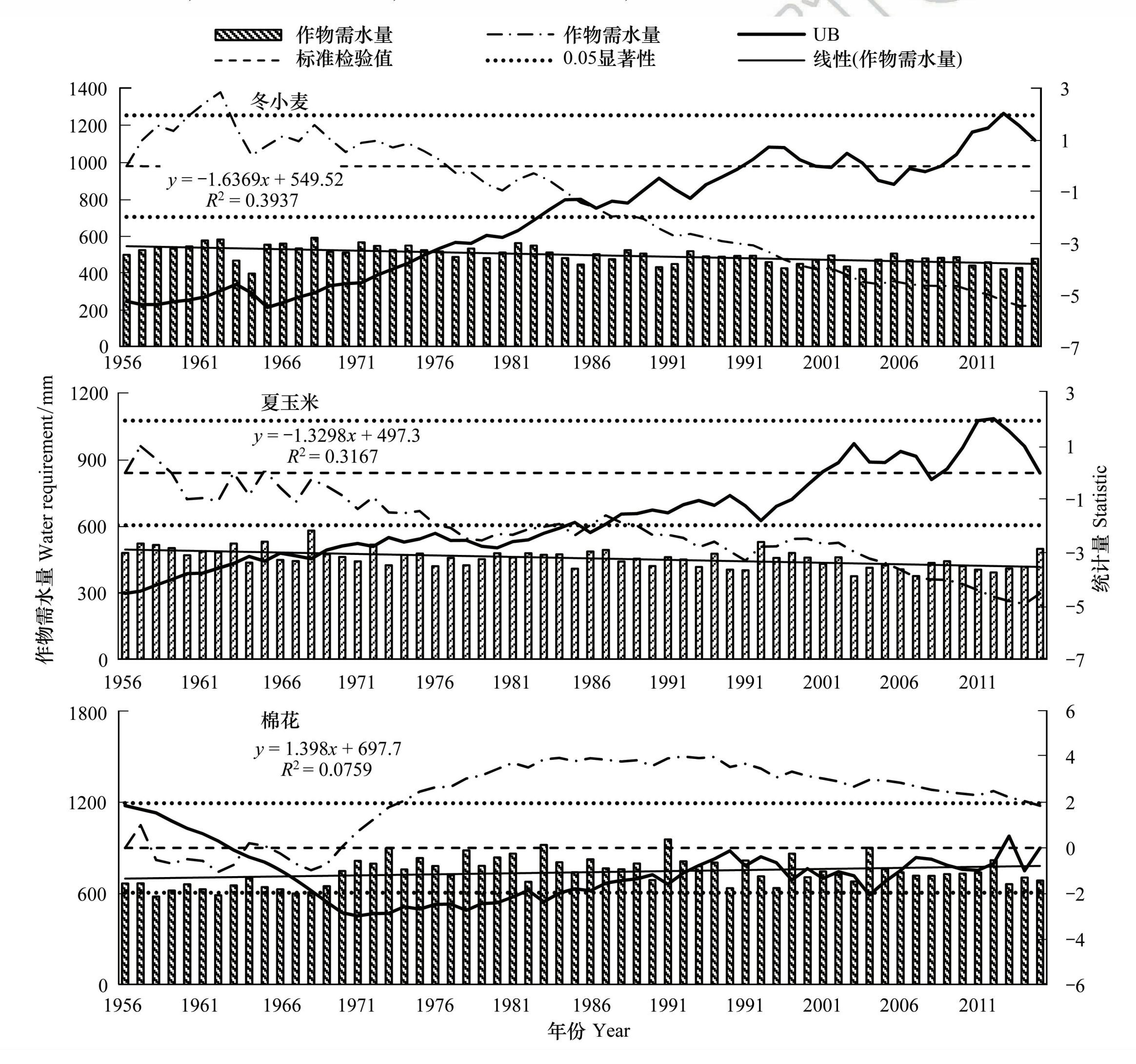


图 4　近 60 a 鸡泽县 3 种主要作物需水量变化趋势图

Fig.4　Trend of water requirement of three main crops in Jize County in recent 60 years

2.2 作物有效降雨量分析

如图 5 所示,不同生育期内冬小麦、夏玉米及棉花平均有效降雨量分别为 13.6、55.6、70.1 mm,作物在生育中期有效降雨量最高,初始生长期和成熟期有效降雨量较小。初始生长期,各作物有效降雨量较小。仅冬小麦具有冻融期及越冬期,且有效降雨量较小。快速发育期冬小麦和棉花有效降雨量是分别是平均有效降雨量的 141.2%和 84.0%,夏玉米有效降雨量相较于初始生长期上升了 74.6%。生育中期,各作物有效降雨量达到最大值。成熟期有效降雨量迅速减少。

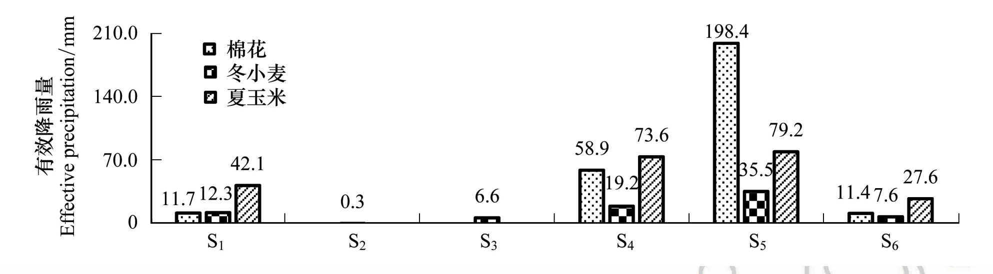


图 5 近 60 a 不同生育期有效降雨量变化情况

Fig.5 Changes of effective precipitation at different growth stages in recent 60 years

根据对 3 种主要作物需水量和作物系数的计算结果,结合公式(3)和(4),得到鸡泽县 3 种主要作物近 60 a 的有效降雨量变化趋势,如图 6 所示。

近 60 a 鸡泽县 3 种作物的有效降雨量变化情况如图 6 所示,从年际波动情况来看,3 种作物均呈不显著减少趋势变化,变化较为一致,且均在 19 世纪 50—70 年代发生突变现象。其中,冬小麦有效降雨量变化倾向率为-2.2 mm/10 a,多年平均有效降雨量为 80.8 mm;1956—1973 年呈增减交替趋势变化;1974 年以后呈不显著减少趋势变化,1978 年有效降雨量最小,为 29.7 mm;近 60 a 共出现 5 次突变现象,均发生在 1967 年之前。夏玉米有效降雨量变化倾向率为-6.3 mm/10 a,多年平均有效降雨量为 222.5 mm;1956—1977 年呈不显著增减交替趋势;1978—1996 年呈不显著减少趋势,1992 年有效降雨量最小仅为 110.6 mm;1997 年以后呈显著减少趋势;此外,1971 年出现突变现象。棉花的有效降雨量变化倾向率为-6.4 mm/10 a,平均有效降雨量为 280.5 mm;1956—1965 年呈不显著增减交替趋势;1966 年以后呈不显著减少趋势变化,1978 年最低仅为 146.9 mm;近 60 a 共出现 6 次突变现象。

2.3 作物缺水量分析

图 7 为河北省主要作物近 60 a 不同生育期内作物缺水量变化情况。不同生育期内冬小麦、夏玉米及棉花平均缺水量分别为 69.7、58.6、66.5 mm。初始生长期夏玉米缺水量达到不同生育期最大值,冬小麦和棉花的缺水量小于平均值;冻融期及越冬期的冬小麦缺水量随需水量较低而有所减少;快速发育期棉花的缺水量达到最大值,夏玉米的缺水量达到最小值;生育中期冬小麦的缺水量达到最大值,棉花缺水量较上一时期下降了 85.0%,夏玉米有所上升;成熟期冬小麦和棉花的缺水量迅速下降,而夏玉米缺水量仅比上一时期下降 2.4 mm。在需水量和有效降雨量的共同作用下,不同生育期间缺水量变化情况与需水量及有效降雨量有所差异。

根据公式(5)对近 60 a 鸡泽县缺水量进行计算,并绘制缺水量变化趋势图。

由图 8,在需水量远超于有效降雨量的情况下,3 种作物缺水量均大于 0,说明鸡泽县在近 60 a 都处在水资源入不敷出的状态,加上作物本身及外在因素的共同作用,年际间各个作物变化趋势差异较大。冬小麦缺水量整体呈显著性减少趋势变化,变化倾向率为-13.2 mm/10 a,多年平均缺水量为 418.9 mm;1956—1985 年基本上呈不显著性增加趋势;1986—1998 年呈不显著减少趋势变化,且在 1995 年出现 1 个突变点;1999 年以后呈显著性减少的趋势变化。夏玉米缺水量整体呈不显著减少的趋势变化,变化倾向率为-7.0 mm/10 a,多年平均缺水量为 234.3 mm;1956—2006 年呈不显著增减交替趋势,且在 2003 年及 2004 年出现突变现象;2006 年以后呈不显著减少的趋势。棉花缺水量整体呈显著性减少的趋势变化,变化倾向率为-22.3 mm/10 a,多年平均缺水量为 295.2 mm;1956—1974 年呈不显著增加趋势;1975—1987 年呈不显著减少趋势变化;

图 6　近 60 a 鸡泽县 3 种主要作物的有效降雨量变化趋势图

Fig.6　Trend of effective precipitation of three main crops in Jize County in recent 60 years

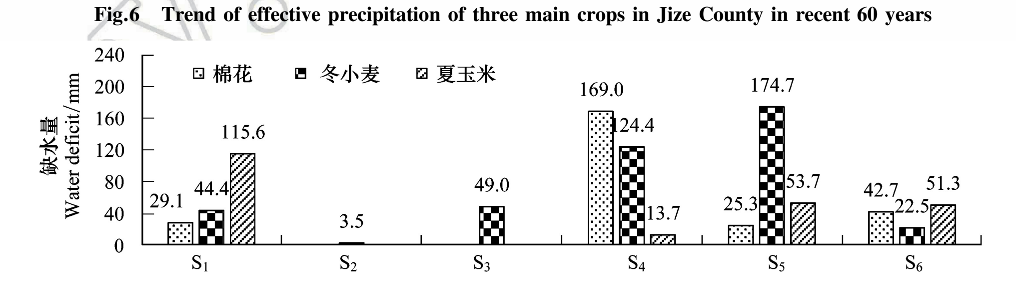


图 7　近 60 a 不同生育期缺水量变化情况

Fig.7　Changes of Water deficit at different growth stages in recent 60 years

1988 年以后棉花缺水量减少趋势,并通过 0.05 的显著性检验,到 2015 年棉花缺水量为 200.0 mm。本文计算结果与文献[11]李春强等对河北省近 35 年农作物缺水量变化趋势分析结果的基本一致。

2.4　作物水分盈亏指数分析

水分盈亏指数不仅考虑了降水和作物蒸散量两项因子,也反映了实际供水情况与最大水分需要量的平衡



图 8 近 60 a 鸡泽县 3 种主要作物的缺水量变化趋势图

Fig.8 Trend of water deficit of three main crops in Jize County in recent 60 years

关系,可以较好地表征农田湿润度和作物旱涝情况。因此,根据公式(6),对河北省鸡泽县近 60 a 3 种作物全生育期内的水分盈亏指数进行计算和分析,结果如图 9 所示。

整体上看,鸡泽县近 60 a 一直处于水资源严重短缺的状态中,3 种作物的水分盈亏指数变化趋势基本相似。冬小麦、夏玉米和棉花的平均水分盈亏指数分别为−83.6%、−51.4%和−51.4%。冬小麦水分盈亏指数最大值出现在 1963 年,为−63.7%,最小值为 1981 年的−94.7%。与其他两种作物相比,夏玉米水分盈亏指数较大,1992 年水分盈亏指数最小,为−75.5%;2003 年出现最大值,为−28.0%。棉花水分盈亏指数变化幅度较大最大值和最小值出现在 1991 年和 1978 年,分别为−30.0%和−73.7%。

3 种作物的水分盈亏指数均在(−100,−20)的区间范围内变化,参照我国气象干旱等级(GB/T20481—2006)及农业干旱等级国家标准(GB/T32136—2015)的划分标准对 3 种作物进行划分,近 60 a 鸡泽县冬小麦水分盈亏指数处于中旱、重旱的干旱等级,夏玉米和棉花水分盈亏指数均处于轻旱、中旱的干旱等级。

3 结论与讨论

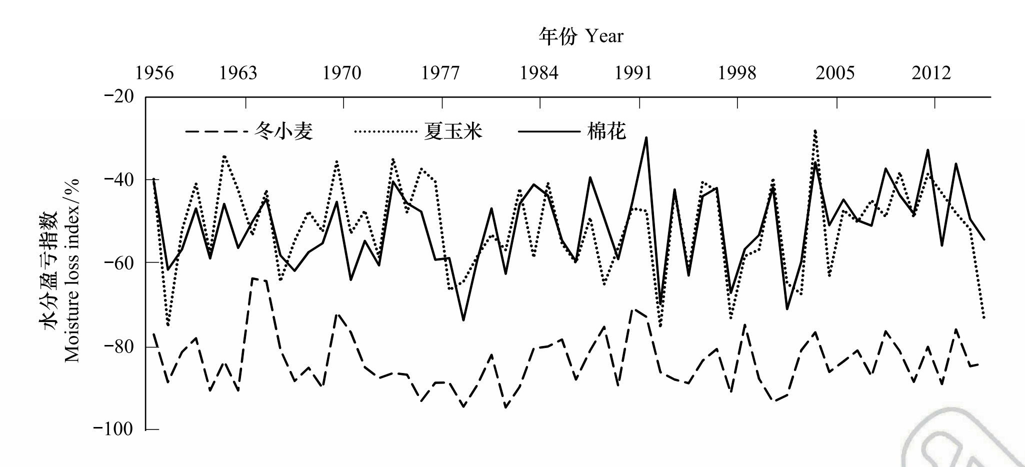


图 9　近 60 a 鸡泽县 3 种主要作物的水分盈亏指数变化趋势图

Fig.9　Trend of moisture loss index of three main crops in Jize County in recent 60 years

3.1　结论

1)作物需水量研究表明,近 60 年鸡泽县 3 种主要作物需水量均呈显著性减少的变化趋势,不同作物多年平均需水量大小为棉花>冬小麦>夏玉米,其中冬小麦最大需水量为 593.2 mm 出现在 1968 年,夏玉米最大需水量为 581.6 mm 也出现在 1968 年,棉花需水量最大为 710.4 mm 出现在 1972 年。通过突变检验分析发现,需水量出现明显拐点的时期均出现在 20 世纪 80 年代,这与作物品种改良有着直接关系。作物需水量的不同与作物自身的生理特性有关,从不同生育期作物需水量变化来看,冬小麦、夏玉米、棉花最大需水量出现时期有所不同,分别位于生育中期、初始生长期和快速发育期。

2)有效降雨量研究表明,近 60 a 鸡泽县 3 种作物的有效降雨量均呈不显著减少的变化趋势,满足作物生长所需的天然降水量逐渐减少,冬小麦、夏玉米和棉花多年平均有效降雨量顺序为棉花>夏玉米>冬小麦,其中冬小麦最大有效降雨量为 170.4 mm 出现在 1963 年,夏玉米最大有效降雨量为 320.5 mm 出现在 1961 年,棉花最大有效降雨量出为 422.7 mm 出现在 1973 年。由于冬小麦的生育期集中在冬春两季,与北方降水不同期,因此有效降雨量远低于夏玉米和棉花。从不同生育期来看,3 种作物的有效降雨量均在生育中期达到最大。

3)从年际间作物缺水量变化情况来看,3 种作物缺水量均呈下降趋势,不同作物多年平均缺水量大小顺序为冬小麦>棉花>夏玉米,突变点均出现在 20 世纪末至 21 世纪初。从水分盈亏指数来看,年际间冬小麦水分盈亏指数在(-100,-60)范围内上下波动,夏玉米和棉花的水分盈亏指数均在(-80,-20)范围内变化。尽管冬小麦需水量和有效降雨量的最大值出现在同一生育期,但水分盈亏指数相对较低,导致干旱等级较高,因此冬小麦缺水形势更为严峻。值得注意的是,3 种作物缺水量的变化规律与需水量基本相似。

3.2　讨论

相关研究表明,近 50 年来,我国华北地区气温增幅较大,且平均增温率超过全国的增温率[22-23]。气温升高理应导致地表蒸散量增加,而鸡泽县的蒸散量呈逐年递减趋势变化,这是由于温度仅是引起蒸散量变化的因素之一,日照时数、风速、相对湿度及降雨量等也对蒸散量起到主要影响的作用,另有研究表明人类活动的影响也是制约蒸散量变化的重要因素之一[24]。因此,作物需水量也呈逐年递减的趋势变化。此外本文仅以鸡泽县为典型区域对河北省冬小麦、夏玉米和棉花的有效降雨量和需水规律进行研究分析略有不足,若增加典型区域个数,并且对典型区域进行空间对比,结果将更加精确。

当前河北省旱情较为严重,在自然水资源严重匮乏及气候暖干化的背景下,农作物的缺水量理应增加。但对河北省作物缺水量的研究发现,在有效降雨量逐年减少的条件下,作物缺水量并未增加。主要归因于近年来河北省大力超采地下水来满足农业需水要求[25],然而,近年来随着地下水严重超采现象,国家相关部门

和地方政府已经采取相应的调控措施，地下水超采已严重影响到作物生长和水资源保护的协调发展，故此如何在水资源得以保护的前提下，解决作物生长灌溉用水问题，提高粮食生产安全将是未来研究的主要方向，单纯就河北省来讲，南水北调中线工程修建开通[26]作为可靠的替代水源将对受水区——河北省的粮食安全起到一定促进作用。

参考文献(References)：

[1] 任国玉，姜彤，李维京，翟盘茂，罗勇，马柱国. 气候变化对中国水资源情势影响综合分析. 水科学进展，2008，19(6)：772-779.

[2] 冯保清. 我国不同尺度灌溉用水效率评价与管理研究[D]. 北京：中国水利水电科学研究院，2013.

[3] 郭进考，史占良，何明琦，张相岐，张爱民，贾旭. 发展节水小麦缓解北方水资源短缺——以河北省冬小麦为例. 中国生态农业学报，2010，18(4)：876-879.

[4] 刘战东，段爱旺，肖俊夫，高阳，刘浩. 冬小麦生育期有效降水量计算模式研究. 灌溉排水学报，2009，28(2)：21-25.

[5] 李志杰. 阿拉善盟腰坝灌区农业水资源利用效率分析[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2015.

[6] 中国农业百科全书农业气象卷编辑委员会. 中国农业百科全书(农业气象卷). 北京：农业出版社，1986.

[7] 邵东国，郭元裕，沈佩君. 区域农业灌溉用水量长期预报模型研究. 灌溉排水，1998，17(3)：26-31.

[8] 李勇，杨晓光，叶清，黄晚华. 1961—2007年长江中下游地区水稻需水量的变化特征. 农业工程学报，2011，27(9)：175-183.

[9] 王静，张晓煜，马国飞，张磊，李红英，朱永宁. 1961—2010年宁夏灌区主要作物需水量时空分布特征. 中国农学通报，2015，31(26)：161-169.

[10] 胡玮，严昌荣，李迎春，周元花，刘勤. 冀京津冬小麦灌溉需水量时空变化特征. 中国农业气象，2013，34(6)：648-654.

[11] 庞艳梅，陈超，潘学标. 1961—2010年四川盆地玉米有效降水和需水量的变化特征. 农业工程学报，2015，31(S1)：133-141.

[12] 丛振涛，姚本智，倪广恒. SRA1B情景下中国主要作物需水预测. 水科学进展，2011，22(1)：38-43.

[13] 李春强，李保国，洪克勤. 河北省近35年农作物需水量变化趋势分析. 中国生态农业学报，2009，17(2)：359-363.

[14] 王飞. 鸡泽县土地整治补充耕地潜力研究[D]. 石家庄：河北师范大学，2013.

[15] 刘占衍，吴旭. 鸡泽县水资源评价分析. 地下水，2015，37(1)：127-128.

[16] 王瑶，赵传燕，田风霞，王超. 黑河中游春小麦需水量空间分布. 生态学报，2011，31(9)：2374-2382.

[17] 汪志农. 灌溉排水工程学(第二版). 北京：中国农业出版社，2010：1-36.

[18] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京：气象出版社，2007：37-38.

[19] 刘钰，Pereira L S. 对FAO推荐的作物系数计算方法的验证. 农业工程学报，2000，16(5)：26-30.

[20] 尹海霞，张勃，王亚敏，张亚宁，王强，赵一飞. 黑河流域中游地区近43年来农作物需水量的变化趋势分析. 资源科学，2012，34(3)：409-417.

[21] 康西言，李春强，高建华，王鑫. 河北省冬小麦生育期蒸降差的时空变化及其原因分析. 中国农业气象，2010，31(2)：261-266.

[22] 沈永平，王国亚. IPCC第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点. 冰川冻土，2013，35(5)：1068-1076.

[23] 胡玮，严昌荣，李迎春，刘勤. 气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响. 生态学报，2014，34(9)：2367-2377.

[24] 高歌，陈德亮，任国玉，陈峪，廖要明. 1956—2000年中国潜在蒸散量变化趋势. 地理研究，2006，25(3)：378-387.

[25] 石建省，王昭，张兆吉，费宇红，李亚松，张凤娥，陈京生，钱永. 华北平原深层地下水超采程度计算与分析. 地学前缘，2010，17(6)：215-220.

[26] 李雪松，李婷婷. 南水北调中线工程水源地市场化生态补偿机制研究. 长江流域资源与环境，2014，23(S1)：66-72.